



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO DE CIÊNCIAS FÍSICAS E MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA

**AVALIAÇÃO ELETROQUÍMICA DO AÇO INOXIDÁVEL AISI 403  
PARA SIMULAR A CORROSÃO EM PALHETAS DE TURBINAS  
A VAPOR**

**WALTER AUGUSTO FRECH**

Florianópolis - SC

2010

Walter Augusto Frech

**AVALIAÇÃO ELETROQUÍMICA DO AÇO INOXIDÁVEL AISI 403  
PARA SIMULAR A CORROSÃO EM PALHETAS DE TURBINAS  
A VAPOR**

Relatório apresentado ao Departamento de Química  
da Universidade Federal de Santa Catarina,  
como requisito parcial da disciplina de  
Estágio Supervisionado II (QMC 5512)

Orientador: Prof. Dr. César Vítório Franco

Florianópolis - SC

2010

Walter Augusto Frech

**AVALIAÇÃO ELETROQUÍMICA DO AÇO INOXIDÁVEL AISI 403  
PARA SIMULAR A CORROSÃO EM PALHETAS DE TURBINAS  
A VAPOR**

---

Profa. Dra. Inês Maria Costa Brighente  
Coordenadora de Estágios do Curso de Química-Bacharelado

Banca Examinadora:

---

Prof. Dr. César Vítório Franco  
Orientador

---

Prof. Dr. Almir Spinelli

---

Profa. Dra. Tereza Cristina Rozzone de Souza

Florianópolis - SC

2010

"Você pode estar sentado na sombra hoje  
porque alguém plantou uma árvore  
tempos atrás."

WARREN BUFFET

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais Osni e Córdula Frech, aos meus irmãos Júnior e Carlos Frech e, em especial, a Jéssica Beck, agradeço a compreensão por talvez não ter-lhes dedicado a atenção merecida durante o período de intenso trabalho.

Ao Prof. Dr. César Franco, pelos grandes ensinamentos, amizade e dedicação.

Ao Prof. Dr. Almir Spinelli, pelos ensinamentos durante a disciplina *Corrosão*, fundamental na compreensão dos processos corrosivos.

A toda equipe do Complexo Termelétrico Jorge Lacerda, pertencente à empresa Tractebel Energia – GDF Suez, em especial a Luiz Augusto Torres e Vilmar de Oliveira, sem os quais este trabalho não seria possível.

Ao amigo Leonardo Uller, pelos ensinamentos e exemplo profissional.

Aos colegas de estudo e trabalho Denise Pacheco, Juliano Carvalho e Raphael Serafim, por tornarem os momentos marcantes e eternos.

Por fim, àquele que gera força para todos os segundos de existência, Deus.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>i</b>
<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>iii</b>
<b>RESUMO .....</b>	<b>iv</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2. REVISÃO DA LITERATURA .....</b>	<b>3</b>
<b>2.1. Corrosão .....</b>	<b>3</b>
<b>2.2. Potenciostato .....</b>	<b>5</b>
2.2.1. <i>Polarização .....</i>	5
2.2.2. <i>Passivação .....</i>	9
2.2.3. <i>Eletrodos Rotatórios e Não-rotatórios .....</i>	10
<b>2.3. Estudo de Caso .....</b>	<b>11</b>
<b>2.4. Turbinas a Vapor e Geração de Energia .....</b>	<b>12</b>
<b>2.5. Problemas Típicos de Corrosão em Turbinas a Vapor .....</b>	<b>14</b>
2.5.1. <i>Corrosão Localizada por Pites .....</i>	14
2.5.2. <i>Corrosão Sob Tensão – CST .....</i>	15
2.5.3. <i>Corrosão-erosão .....</i>	16
2.5.4. <i>Corrosão com Cavitação .....</i>	16
2.5.5. <i>Corrosão-fadiga .....</i>	16
<b>3. OBJETIVOS .....</b>	<b>18</b>
<b>3.1. Objetivo Geral .....</b>	<b>18</b>
<b>3.2. Objetivos Específicos .....</b>	<b>18</b>
<b>4. MATERIAIS &amp; MÉTODOS .....</b>	<b>19</b>
<b>4.1. Estudos Eletroquímicos .....</b>	<b>19</b>

4.2. Técnica do Menisco .....	20
4.3. Parâmetros Utilizados nos Estudos Eletroquímicos .....	21
5. RESULTADOS & DISCUSSÕES .....	22
5.1. Estudos Eletroquímicos de Tafel .....	22
5.1.1. <i>Eletrodos Rotatórios</i> .....	22
5.1.2. <i>Eletrodos Não-rotatórios</i> .....	23
5.2. Polarização Potenciodinâmica .....	25
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	29
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	30

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> – (a) Turbina de baixa pressão da UTJLC. (b) Palheta fraturada e marcação em branco das outras palhetas trincadas. (c) Depósitos de sais nas palhetas do estágio L-1 da turbina de baixa pressão. .....	2
<b>Figura 2</b> – Ciclo da corrosão. ....	3
<b>Figura 3</b> – Esquema da interface do metal, eletricamente carregado, e seus íons solvatados. ....	4
<b>Figura 4</b> – Representação gráfica da lei de Tafel. ....	7
<b>Figura 5</b> – Curva de polarização clássica. ....	8
<b>Figura 6</b> – Esquema representando um eletrodo de trabalho rotatório, onde 1) eletrodo de trabalho; 2) haste de teflon; 3) eixo do eletrodo; e 4) fluxo do eletrólito produzido pela rotação do eletrodo. ....	10
<b>Figura 7</b> – Aparecimento de pites causado pela corrosão, associado à alta concentração de tensão residual nos furos de passagem do aro de união das palhetas, propagam trincas que causam o dano final por corrosão-fadiga na turbina de baixa pressão da UTJLC. ....	12
<b>Figura 8</b> – Perfil esquemático do processo de geração de energia elétrica em UTE. ....	13
<b>Figura 9</b> – Esquema da turbina de baixa pressão. Em vermelho, o destaque da palheta L-1 fraturada na turbina de baixa pressão, da UTJLC. .....	13
<b>Figura 10</b> – Corrosão localizada por pites. ....	14
<b>Figura 11</b> – Corrosão sob tensão (CST). ....	15
<b>Figura 12</b> – Corrosão-erosão. ....	16
<b>Figura 13</b> – Corrosão-fadiga. ....	17
<b>Figura 14</b> – a) Eixo suporte fixado ao rotor <i>Pine Instruments Company</i> – Modelo ASR utilizado nos testes. b) Corpo de prova fabricado em aço	



inoxidável AISI 403. ....	19
<b>Figura 15</b> – Imagem ilustrativa do equipamento <i>Pine Instruments Company</i> – Modelo ASR, da célula eletroquímica (contendo NaCl a 25%) e do eletrodo rotatório. ....	20
<b>Figura 16</b> – Esquema da preparação do corpo de prova, utilizando a técnica do menisco. ....	21
<b>Figura 17</b> – Gráfico de Tafel para solução contendo NaCl a 25% em eletrodo rotatório. ....	23
<b>Figura 18</b> – Gráfico de Tafel para solução contendo NaOH a 40% em eletrodo rotatório. ....	23
<b>Figura 19</b> – Gráfico de Tafel para solução contendo NaCl a 25% em eletrodo não-rotatório. ....	24
<b>Figura 20</b> – Gráfico de Tafel para solução contendo NaOH a 40% em eletrodo não-rotatório. ....	25
<b>Figura 21</b> – Gráficos sobrepostos do ensaio potenciodinâmico em A) solução de NaOH a 40% e B) solução de NaCl a 25%. ....	26
<b>Figura 22</b> – Corpo de prova AISI 403 após teste potenciodinâmico em solução de NaCl a 25%, onde (a) aumento de 50 vezes e (b) aumento de 1000 vezes no MEV. ....	27
<b>Figura 23</b> – Corpo de prova AISI 403 após teste potenciodinâmico em solução de NaOH a 40%, onde (a) aumento de 50 vezes e (b) aumento de 1000 vezes no MEV. ....	27

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela I</b> – Resistência relativa à corrosão dos materiais. ....	<b>9</b>
<b>Tabela II</b> – Parâmetros utilizados nos estudos eletroquímicos. ....	<b>21</b>
<b>Tabela III</b> – Estudos eletroquímicos de Tafel em eletrodo rotatório. ....	<b>22</b>
<b>Tabela IV</b> – Estudos eletroquímicos de Tafel em eletrodo não-rotatório. ....	<b>24</b>
<b>Tabela V</b> – Estudo eletroquímico de polarização potenciodinâmica. ....	<b>28</b>

## RESUMO

Corrosão é um fenômeno ou processo que segue as leis da natureza e, tal fato, não pode ser considerado surpresa. Para quase todos os materiais, espera-se que a deterioração ocorra com o tempo, quando expostos a determinado meio. Por exemplo, quando o ferro é exposto ao ar ou água, desenvolve-se uma camada fina de óxido de ferro em horas, mostrando então a familiar coloração laranja-marrom da ferrugem. Essa camada de óxido pode formar uma barreira protetora contra o ataque contínuo do meio e diminuir a velocidade de corrosão. Tal processo natural é conhecido como passivação.

Geralmente, a corrosão dos metais envolve processos eletroquímicos, ocorrendo fluxo de eletricidade na superfície do metal para outras regiões, através de uma solução capaz de conduzir eletricidade, conhecida como eletrólito. O método mais usual para o estudo das reações eletroquímicas de um material é pela utilização do potenciostato, um equipamento fundamental no estudo do comportamento eletroquímico de aços inoxidáveis utilizados na fabricação de componentes para turbinas a vapor, como palhetas e rotores.

Neste trabalho, estudos com eletrodos rotatórios de aço inoxidável AISI 403, formando menisco em meios corrosivos, foram realizados visando obter condições semelhantes ao encontrado em turbinas a vapor de baixa pressão (NaCl a 25% e NaOH a 40%). Tais estudos foram realizados com auxílio das técnicas de polarização potenciodinâmica e curvas de Tafel. Nas turbinas de baixa pressão, utilizadas para geração de energia elétrica, íons como cloreto e hidróxido quando associados a concentradores de tensões provocam trincas, que podem se propagar e levar à fratura de palhetas por meio do processo conhecido como corrosão-fadiga. As falhas dos componentes das turbinas geram prejuízos e aumento nos custos de manutenção, além da perda da confiabilidade operacional do equipamento.

**Palavras-chave:** *corrosão, eletroquímica, turbina a vapor, resistência à corrosão.*

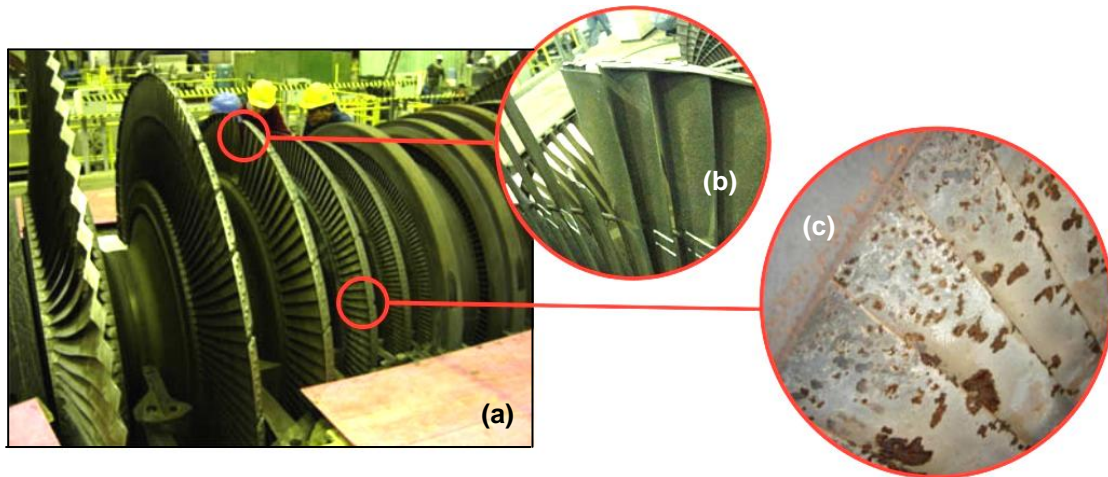
## 1. INTRODUÇÃO

Com origem no latim, a palavra corrosão deriva do verbo *corrode*, o qual significa roer, bastante sugestivo. Num aspecto muito difundido universalmente, pode-se definir corrosão como a deterioração de um material, geralmente metálico, por ação química ou eletroquímica do ambiente associada ou não a esforços mecânicos.<sup>1</sup> Sendo a corrosão, em geral, um processo espontâneo, está constantemente transformando os materiais metálicos de modo que a durabilidade e desempenho dos mesmos deixam de satisfazer os fins a que se destinam.<sup>2</sup> Não fora o emprego de mecanismos protetores, ter-se-ia a destruição completa dos materiais metálicos, já que os processos de corrosão são reações químicas e eletroquímicas que se passam na superfície do metal e obedecem a princípios bem estabelecidos.<sup>1</sup>

A importância da corrosão está intimamente relacionada ao seu custo, é o que mostra o trabalho intitulado “*Corrosion Costs and Preventive Strategies*” elaborado nos Estados Unidos, referente aos gastos com a corrosão naquele país. O trabalho foi executado pelo *CC Technologies Laboratories, Inc.* sob a supervisão da *U.S. Federal Highway – FHWA* e com apoio da *National Association of Corrosion Engineers – NACE*, por solicitação do Congresso Americano. O estudo foi realizado durante dois anos (1999 – 2001) e chegou à quantia de 276 bilhões de dólares, aproximadamente, 3,1% do Produto Interno Bruto da época envolvendo custos diretos e indiretos com a corrosão.<sup>3</sup> No Brasil, embora não se tenha levantamentos específicos, é comum adotar-se o índice de 3,5% do Produto Interno Bruto como o custo da corrosão, o que corresponderia a cerca de 45 bilhões de reais por ano.<sup>2</sup>

Somente no setor elétrico, os custos diretos e indiretos com corrosão chegam a 14,4% desse valor.<sup>4</sup> Um exemplo da magnitude dos efeitos causados pelos processos corrosivos ocorreu na Usina Termelétrica Jorge Lacerda, Unidade C – UTJLC (que utiliza carvão mineral como combustível), localizada na cidade de Capivari de Baixo, Sul do Estado de Santa Catarina, e que produz hoje 363.000 quilowatts (kW) de potência. Em 2002, a UTJLC ficou fora de operação durante seis meses devido a uma falha ocasionada pela corrosão nas palhetas da turbina a vapor de baixa pressão (Figura 1). A falha foi atribuída à ruptura de uma das palhetas e ao trincamento de outras trinta e

nove. O lucro cessante da empresa com a parada de máquina, envolvendo custos diretos e indiretos com a corrosão, chegaram a 8,5 milhões de reais,<sup>5</sup> justificando a presente proposta deste trabalho no aprimoramento dos estudos quanto à origem dos processos corrosivos e à resistência dos materiais.



**Figura 1** – (a) Turbina de baixa pressão da UTJLC. (b) Palheta fraturada e marcação em branco das outras palhetas trincadas. (c) Depósitos de sais nas palhetas do estágio L-1 da turbina de baixa pressão.

Todos os equipamentos e instalações industriais representam investimentos vultosos que exigem durabilidade e resistência à corrosão, justificando os valores investidos e evitando potenciais acidentes com danos materiais incalculáveis ou danos pessoais irreparáveis. Com o avanço tecnológico mundialmente alcançado, os custos com a corrosão evidentemente se elevam, tornando-se um fator de grande importância a ser considerado já na fase de projeto de grandes instalações industriais, para evitar ou minimizar futuros processos corrosivos. Daí se dizer que a corrosão caminha em paralelo ao desenvolvimento tecnológico. No seu todo, o fenômeno corrosivo assume uma importância transcendental na vida moderna, que não pode prescindir dos metais e suas ligas.

## 2. REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1. Corrosão

O conceito de resistência à corrosão está intimamente relacionado ao de integridade de equipamentos e instalações industriais, que por sua vez tem uma importante vinculação com os aspectos de confiabilidade operacional. Nos processos corrosivos, os metais, no seu estado elementar, reagem com os elementos não-metálicos presentes no meio, particularmente com cloro, enxofre e oxigênio, produzindo compostos semelhantes aos encontrados na natureza dos quais foram extraídos. Conclui-se que, nestes casos, a corrosão corresponde ao inverso do processo metalúrgico (Figura 2).<sup>2</sup>

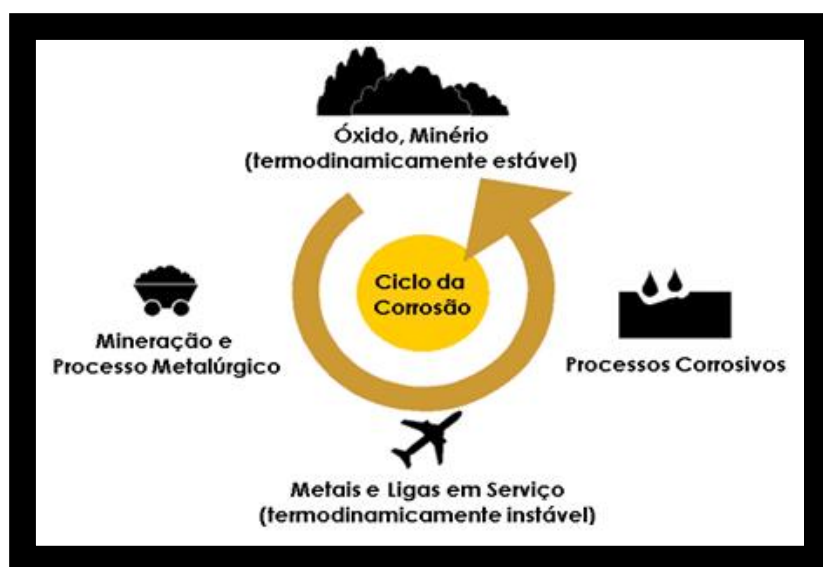
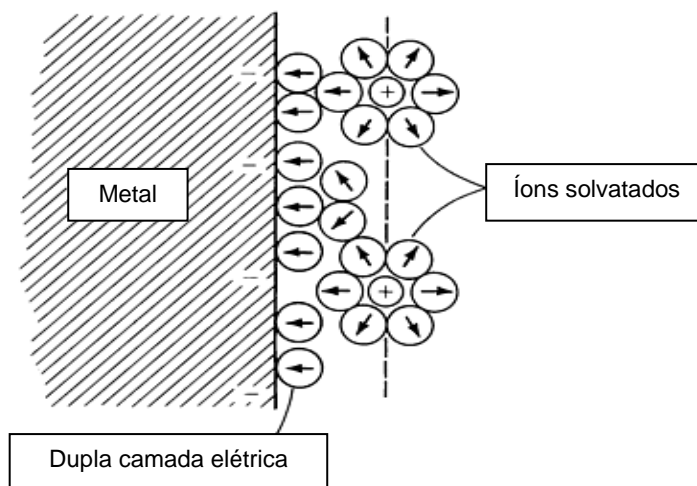
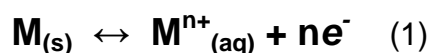


Figura 2 – Ciclo da corrosão.

De acordo com a Figura 2, esta é a razão termodinâmica da espontaneidade das reações de corrosão que transformam os metais novamente em compostos, num processo inverso ao metalúrgico, onde a energia liberada nessa transformação é perdida para o meio. Dependendo da forma de ação do meio corrosivo sobre o material, os processos de corrosão podem ser classificados em dois grandes grupos, abrangendo quase todos os casos de deterioração dos materiais, a corrosão química e a eletroquímica. A corrosão química tem características pela ausência de água líquida,

temperatura acima do ponto de orvalho e interação direta entre o metal e o meio. Já a corrosão eletroquímica tem como características a presença de água líquida, temperatura abaixo do ponto de orvalho e processo semelhante à formação de pilhas ou células galvânicas.<sup>2</sup> No presente trabalho será abordada especificamente a corrosão eletroquímica.

A corrosão eletroquímica constitui-se no processo de corrosão mais freqüente na natureza. A imersão de um metal em um determinado meio determina o estabelecimento de uma diferença de potencial entre as duas fases, a sólida e a líquida. Esta diferença de potencial é, simultaneamente, de natureza elétrica e de natureza química, e por isso se denomina diferença de potencial eletroquímico. O sistema constituído pelo metal e pela solução tende a evoluir espontaneamente de modo a atingir um estado de equilíbrio. Este equilíbrio eletroquímico pode ser representado pela equação química (1) e demonstrado pela Figura 3, a seguir.<sup>1, 6</sup>



**Figura 3** – Esquema da interface do metal, eletricamente carregado, e seus íons solvatados.

Num determinado momento, o metal pode apresentar uma carga elétrica numa região de sua superfície que apresenta deficiência de elétrons (carga negativa). A região da interface, que pertence à solução, contém moléculas do eletrólito que apresentam dipolos. Tais dipolos se orientam na interface de

acordo com o sinal da carga existente na superfície metálica e nela ficam adsorvidos. Na superfície metálica ficam também adsorvidos alguns íons existentes na solução, seja do metal ou do solvente. Alguns íons do metal existentes na solução, que não estão adsorvidos, ficam solvatados, isto é, ficam envolvidos pelas moléculas polares do solvente e se situam em regiões mais afastadas da superfície metálica. O arranjo ordenado de cargas elétricas na interface metal-solução é o que constitui a dupla camada elétrica.<sup>1</sup>

Quando o potencial dos íons metálicos na rede cristalina do metal for maior que o potencial dos íons metálicos em solução, haverá a tendência espontânea de aqueles íons passarem para a solução e a lâmina metálica ficar com excesso de carga elétrica negativa, pois os elétrons não podem existir livres na solução, permanecendo no metal. A transferência desses íons prosseguirá até que o potencial da lâmina atinja um equilíbrio com o potencial da solução.<sup>1</sup> Em resumo, o metal tem em si uma parcela de energia acumulada que será liberada à medida que seus íons forem transferidos à solução.<sup>3</sup>

## **2.2. Potenciostato**

O método mais usual para o estudo das reações eletroquímicas de um material é pela utilização do potenciostato, equipamento fundamental no estudo do comportamento eletroquímico de aços inoxidáveis. O potenciostato é um dispositivo eletro-eletrônico capaz de manter constante uma diferença de potencial entre um eletrodo de trabalho (corpo de prova em estudo) e um eletrodo de referência. O eletrodo de referência permite a leitura do potencial a que está submetido o eletrodo de trabalho. Essa informação, associada à corrente registrada no sistema, permite caracterizar as reações eletroquímicas.<sup>7</sup>

### **2.2.1. Polarização**

Todo metal imerso em uma solução contendo seus próprios íons possui um potencial  $E$ , dado pela equação de Nernst. Se uma corrente circular por esse eletrodo, o potencial variará, e o novo valor de potencial  $E'$  dependerá da corrente aplicada. A diferença entre os dois potenciais é conhecida como



sobrepotencial. Pode ocorrer que o potencial inicial seja diferente do potencial de equilíbrio termodinâmico, devido a reações e fenômenos que interferem no processo. É o caso mais comum em corrosão, sendo esse valor conhecido como potencial de corrosão,  $E_{\text{corr}}$ , ou potencial de circuito aberto. O potencial de corrosão também varia ao circular uma corrente pelo eletrodo, sendo essa variação conhecida como polarização.<sup>1</sup>

A relação entre polarização de um metal em corrosão e a densidade de corrente correspondente foi estabelecida empiricamente por Tafel. A expressão matemática dessa lei é conhecida como equação de Tafel (2)<sup>1</sup>

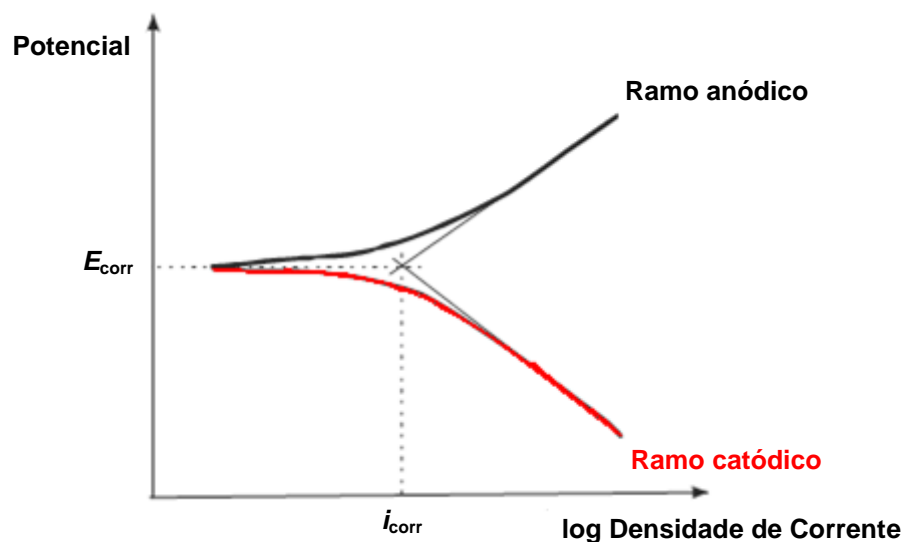
$$\eta = a + b \log i \quad (2)$$

cujos termos têm o seguinte significado:

- Para polarização anódica, tem-se  $\eta_a = a_a + b_a \log i_a$ .  
Onde  $a_a = (-2,3 R/T\beta nF) \log i_{\text{corr}}$  e  $b_a = 2,3 R/T\beta nF$ ;
- Para polarização catódica tem-se  $\eta_c = a_c + b_c \log i_c$ .  
Onde  $a_c = (2,3 RT/(1-\beta)nF) \log i_{\text{corr}}$  e  $b_c = 2,3 RT/(1-\beta)nF$ .

Nessas expressões tem-se **a** e **b** constantes de Tafel que reúnem a constante dos gases **R**, temperatura **T**, coeficiente de transferência  $\beta$ , número de oxidação da espécie eletroativa **n** e o valor de Faraday **F**. Também nessas expressões apresenta-se a densidade de corrente medida **i**, densidade de corrente de corrosão  $i_{\text{corr}}$  e sobretensão em relação ao potencial de corrosão  $\eta (E - E)$ .<sup>1</sup>

A representação gráfica da lei de Tafel pode ser feita num diagrama **E** em função de **log i** (Figura 4). A partir do potencial de corrosão, inicia-se a polarização catódica ou anódica, medindo-se para cada sobrepotencial a corrente característica. À medida que a polarização avança, os dois fenômenos (catódico e anódico) tornam-se independentes e aproximam-se das retas de Tafel previstas pela equação. A extrapolação dessas retas ao potencial de corrosão possibilita a obtenção da corrente de corrosão.<sup>1</sup>



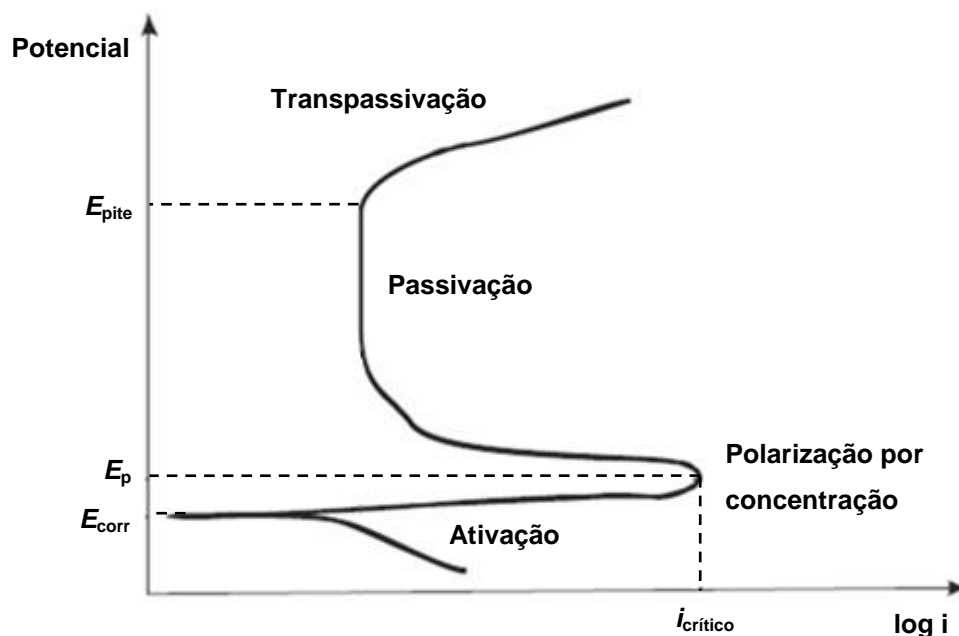
**Figura 4** – Representação gráfica da lei de Tafel.

Entre os numerosos métodos de estudo da corrosão eletroquímica, a polarização é fundamental. Esse método consiste em realizar uma eletrólise, em que se utilizam como eletrodo e eletrólito, respectivamente, o metal e o meio cuja interação se deseja estudar. O ensaio pode ser conduzido a potencial de eletrodo controlado (medindo-se os valores de corrente em função do potencial aplicado), ou então à corrente de eletrólise controlada (anotando-se os valores de potencial em função da corrente). Representando-se graficamente a relação  $E = f(i)$  ou  $i = f(E)$ , obtém-se uma curva de polarização.<sup>1</sup>

As curvas de polarização a potencial controlado podem ser de dois tipos, potenciocinética ou potenciostática. A curva potenciocinética é aquela em que se tem variação contínua ou em degraus do potencial de eletrodo, em função do tempo  $t$ . O registro imediato da corrente, em função da variação de potencial, implicará a obtenção de uma curva de polarização, que será a resposta do sistema àquela variação de potencial imposta externamente. Já a curva potenciostática é aquela em que se tem variação descontínua do potencial de eletrodo, modificando-o ponto a ponto e medindo-se a corrente correspondente, após sua estabilização. Neste caso, os valores obtidos, chamados de valores estacionários, não são função do tempo.<sup>1</sup>

As curvas de polarização anódica são importantes para o estudo e identificação de sistemas metal-meio passiváveis, por exemplo, os aços

inoxidáveis. Curvas clássicas encontradas em sistemas de interesse para corrosão têm aspecto como da Figura 5.<sup>1, 8, 9, 10</sup>



**Figura 5** – Curva de polarização clássica.

Iniciando-se a polarização anódica a partir do potencial de corrosão,  $E_{corr}$ , do metal no meio de interesse, evidencia-se na curva acima um processo de ativação ( $\eta = a + b \log i$ ), seguido por uma polarização por concentração, o processo de passivação e a ruptura localizada do filme passivo a partir de certo potencial, chamado potencial de pite. Os parâmetros de interesse nessas curvas são a corrente crítica  $i_{critico}$  – corrente que precisa ser atingida durante a polarização para que o metal sofra passivação; quanto menor  $i_{critico}$  mais facilmente o metal passiva –, o potencial de passivação  $E_p$  – quanto mais próximo  $E_p$  estiver de  $E_{corr}$ , menor a polarização que o metal necessita para passivar – e faixa de potencial em que o metal permanece passivo, ou seja, possibilidade de ocorrência de corrosão por pites (*Item 2.5.1.*) em potenciais mais altos. Se a possibilidade de corrosão por pites não puder ser eliminada, é interessante ao menos que o potencial em que ela ocorre seja alto, assim, dificilmente será atingido em condições naturais.<sup>1</sup>

Baseado nas velocidades de corrosão, Fontana<sup>16</sup> estabeleceu uma classificação de resistência relativa à corrosão nos materiais, como mostra a

Tabela I, a seguir.

**Tabela I** – Resistência relativa à corrosão dos materiais.

RESISTÊNCIA RELATIVA À CORROSÃO	VELOCIDADE DE CORROSÃO (mm ano <sup>-1</sup> )
Extraordinário	< 0,02
Excelente	0,02 – 0,1
Bom	0,1 – 0,5
Razoável	0,5 – 1,0
Pobre	1,0 – 5,0
Inaceitável	> 5,0

### 2.2.2. Passivação

Observa-se, experimentalmente, que alguns metais podem apresentar comportamento diferente do que seria previsto pelas suas posições na tabela de potenciais. Essa característica é denominada passivação. Admite-se que a passivação seja causada por um filme muito fino de óxido na superfície metálica ou por um estado oxidado da superfície, que impede o contato entre o metal e o meio corrosivo. Nas condições em que o material se torna passivo, seu comportamento eletroquímico revela um potencial mais nobre, isto é, menos ativo que o normalmente apresentado. Portanto, o material sofre corrosão lentamente.<sup>1</sup>

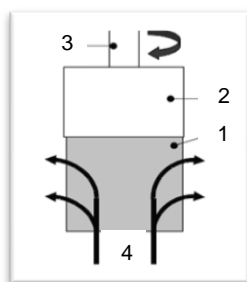
A passivação é um processo que depende do material e do meio. Alguns metais e ligas, por exemplo, cromo, níquel, molibdênio, titânio, zircônio, aços inoxidáveis (70% Ni – 30% Cu), se passivam no ar. Outros somente sofrem passivação em meios muito específicos. A passivação melhora a resistência a corrosão e é conseguida por oxidação usando-se substâncias convenientes ou por polarização anódica. O fato de grande importância para fins práticos é a existência de metais que, a partir de certo potencial, cujo valor varia com o meio e outros fatores, apresentam um filme protetor na sua superfície, o qual reduz a corrente de dissolução a valores desprezíveis.<sup>1</sup>

A passividade de um metal pode ser destruída por substâncias redutoras, polarização catódica ou íons halogenetos, principalmente o cloreto, que penetra na camada de óxido ou a dispersa sob forma coloidal, aumentando sua permeabilidade. Metais ou ligas de cromo, alumínio ou aço inoxidável, passivos no ar, tem sua passividade destruída por íons cloreto em pontos ou áreas localizados. Na pilha ativa-passiva que se forma, a área anódica está localizada nos pontos em que houve destruição da passividade e, como essas áreas são muito pequenas em relação à grande área catódica, haverá corrosão acelerada nesses pontos.<sup>1</sup>

### 2.2.3. Eletrodos Rotatórios e Não-rotatórios

Os estudos eletroquímicos de um determinado sistema devem aproximar-se ao máximo do caso real estudado. Portanto, em alguns casos, é necessário a utilização de célula eletroquímica composta por um eletrodo rotatório (eletrodo de trabalho) e outros dois eletrodos fixos (eletrodo de referência e contra-eletrodo) imersos na solução eletrolítica, visando simular o ambiente das turbinas a vapor.<sup>11</sup> Neste trabalho será avaliada a correlação da velocidade de corrosão com agitação (eletrodo rotatório) e sem agitação (eletrodo não-rotatório) da solução.

Considerando a utilização de eletrodos rotatórios, é necessário saber que o transporte de massa é otimizado e a polarização por concentração ( $\eta_{conc}$ ) é diminuída no eletrodo de trabalho. A repetibilidade do controle de convecção é alcançada abaixo do fluxo laminar, o qual é mais facilmente obtido experimentalmente por eletrodo rotatório (Figura 6).<sup>11</sup>



**Figura 6** – Esquema representando um eletrodo de trabalho rotatório, onde 1) eletrodo de trabalho; 2) haste de teflon; 3) eixo do eletrodo; e 4) fluxo do eletrólito produzido pela rotação do eletrodo.

Pelo fato de que a velocidade da reação catódica é proporcional à concentração do reagente na superfície metálica, a velocidade da reação será limitada pela diminuição na concentração do oxidante, isto é, haverá polarização. Desse modo, o processo de corrosão será controlado pelo transporte de massa. Três mecanismos contribuem para o transporte de massa no interior do eletrólito, sendo elas a difusão, a convecção e a migração. Para espécies neutras, tais como o oxigênio dissolvido e para espécies iônicas presentes em pequenas quantidades, as contribuições da migração e da convecção são desprezíveis. O transporte ocorre, basicamente, por difusão.<sup>11</sup>

### **2.3. Estudo de Caso**

Este Trabalho de Conclusão de Curso é baseado em um estudo de corrosão realizado na UTJLC, que opera utilizando combustível fóssil, na cidade de Capivari de Baixo, Sul do Estado de Santa Catarina. A turbina de Modelo TCDF 3.600 rpm, sete estágios AP (alta pressão), cinco estágios MP (média pressão) e 12 estágios BP (baixa pressão) foi fabricada pela empresa italiana Ansaldo Spa e possui 363 megawatts (MW) de potência elétrica instalada. A UTJLC pertence à empresa Tractebel Energia – GDF Suez.<sup>12</sup>

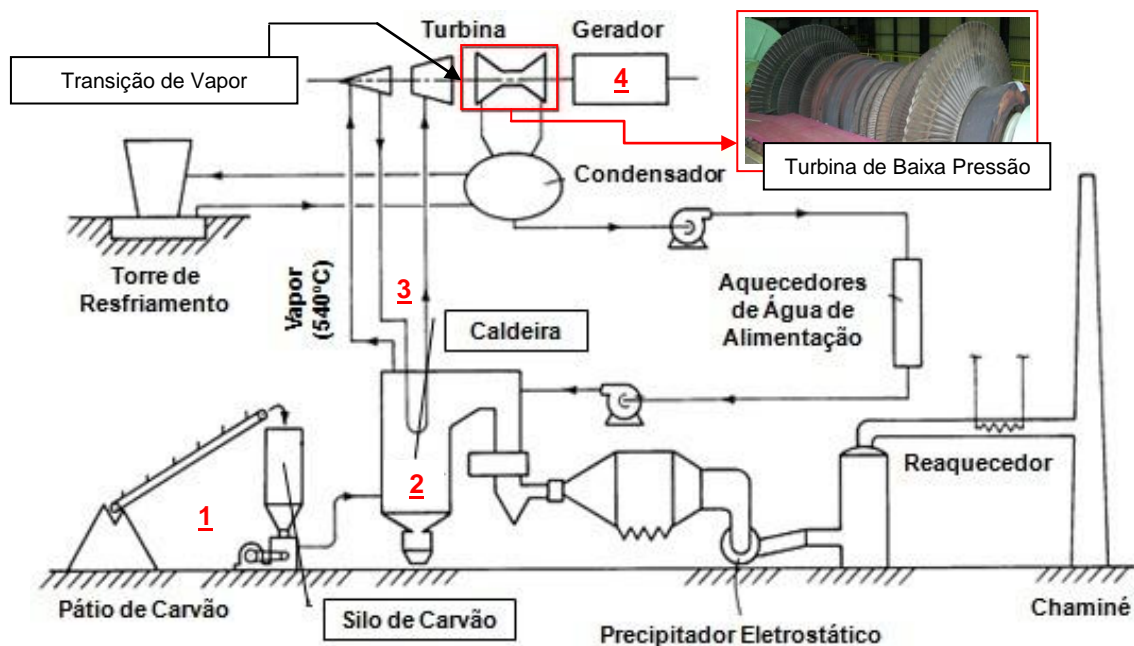
No ano de 2002, a UTJLC sofreu interrupção na produção de energia elétrica devido à ruptura de uma única palheta da turbina de baixa pressão, após 43.000 horas de operação. Além dessa falha, foram detectadas outras trinta e nove palhetas trincadas. As palhetas do estágio L-1 (penúltimo estágio) foram substituídas, todavia com o mesmo desenho, e a unidade voltou a operação. A causa das falhas nas palhetas foi devido à presença de pites de corrosão na sua superfície, como mostra a Figura 7, e que pelo mecanismo de corrosão-fadiga (*Item 2.5.5.*) levaram a ruptura e ao trincamento das outras palhetas.<sup>12</sup>



**Figura 7** – Aparecimento de pites causado pela corrosão, associado à alta concentração de tensão residual nos furos de passagem do aro de união das palhetas, propagam trincas que causam o dano final por corrosão-fadiga na turbina de baixa pressão da UTJLC.

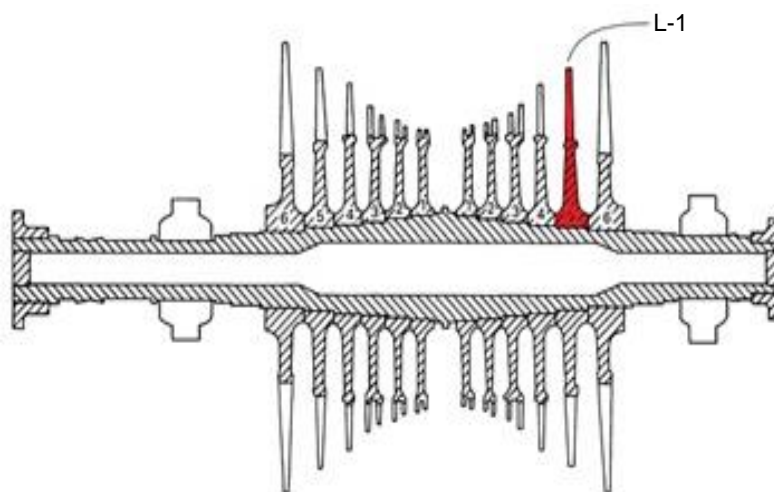
#### **2.4. Turbinas a Vapor e Geração de Energia**

Considerando todo o sistema de geração de energia elétrica a partir de turbinas a vapor, em Usinas Termelétricas de Energia – UTE, a Figura 8 apresenta um esquema resumido do que ocorre nestas unidades: 1) o carvão extraído do solo é fragmentado e transformado em pó, permitindo um melhor aproveitamento térmico ao ser colocado para queima nas fornalhas da caldeira; 2) o calor liberado por esta queima, ao ser transferido para a água que circula nos tubos que envolvem a fornalha, é transformado em vapor; 3) a energia térmica (ou calor) contida no vapor é transformada em energia mecânica (ou cinética), que movimenta a turbina do gerador de energia elétrica; e 4) Este movimento das turbinas de alta, média e baixa pressão dá origem à energia elétrica.<sup>4, 6</sup>



**Figura 8** – Perfil esquemático do processo de geração de energia elétrica em UTE.

Estima-se que bilhões de toneladas de vapor podem passar pelas turbinas ao longo da sua vida útil. Na transição de vapor superaquecido, da turbina de média pressão, para vapor úmido, na turbina de baixa pressão, encontram-se as regiões consideradas mais propícias à corrosão.<sup>13</sup> Tal fenômeno ocorre porque nestes estágios da turbina o vapor perde calor e condensa sobre as palhetas, iniciando o processo de corrosão eletroquímica (Figura 9).<sup>5, 6, 13</sup>



**Figura 9** – Esquema da turbina de baixa pressão. Em vermelho, o destaque da palheta L-1 fraturada na turbina de baixa pressão, da UTJLC.



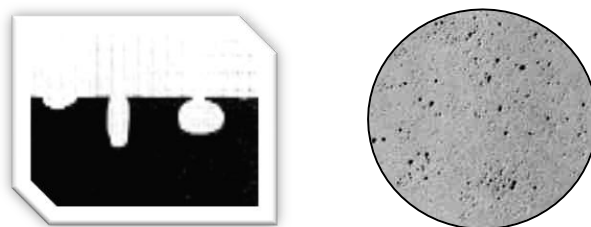
## 2.5. Problemas Típicos de Corrosão em Turbinas a Vapor

Mesmo níveis rigorosamente baixos de impurezas presentes no vapor (partes por bilhão – p.p.b.) podem, eventualmente, causar sérios danos aos equipamentos, nos quais tensões e agentes corrosivos atuam conjuntamente de forma prejudicial, culminando em eventos derradeiros e catastróficos.<sup>13</sup> As formas (ou tipos) de corrosão podem ser apresentadas considerando-se a aparência ou forma de ataque e as diferentes causas da corrosão e seus mecanismos. Assim, pode-se ter corrosão segundo a morfologia, as causas ou mecanismos, os fatores mecânicos, o meio corrosivo e a localização do ataque.<sup>1</sup>

Na região de baixa pressão das turbinas a vapor, como citado anteriormente, se desencadeiam uma série de processos corrosivos. Há muitos anos, tem-se estabelecido que grande parte dos problemas de operação das turbinas a vapor derivam, principalmente, de corrosão localizada por pites, corrosão sob tensão (CST), corrosão-erosão, corrosão com cavitação e corrosão-fadiga.<sup>5</sup>

### 2.5.1. Corrosão Localizada por Pites

A corrosão por pites (Figura 10) é uma forma de corrosão que se processa em pontos ou pequenas áreas localizadas na superfície metálica produzindo os chamados pites, que são cavidades que apresentam o fundo em forma angulosa e profundidade geralmente maior do que o seu diâmetro.<sup>1</sup>



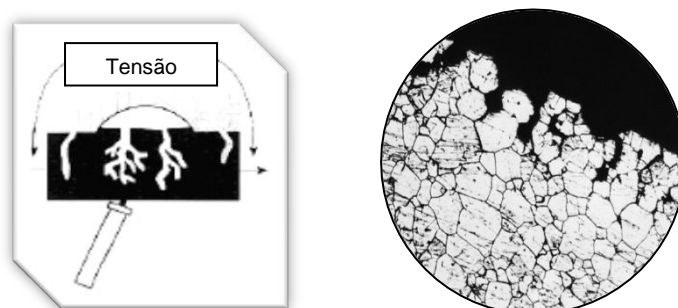
**Figura 10** – Corrosão localizada por pites.

Essa forma de corrosão é característica dos materiais metálicos formadores de camadas passivadoras e resulta, de modo geral, na atuação da

ilha ativa-passiva nos pontos onde a camada passivadora é rompida. Nesses materiais, a quebra do filme passivo ocorre pela ação dos chamados íons halogenetos, principalmente o cloreto, e esta dissolução localizada da película gera uma área ativa que, diante do restante passivado, provoca corrosão intensa e localizada. Resulta daí que a pequena área ativa formada, diante uma grande área catódica, provoca a corrosão intensa e localizada.<sup>2</sup>

#### 2.5.2. Corrosão Sob Tensão – CST

A CST ocorre quando um material, submetido a tensões de tração (aplicadas ou residuais), é colocado em contato com um meio corrosivo específico. Neste tipo de corrosão formam-se trincas no material (Figura 11) e a sua propagação é geralmente lenta, até atingir o tamanho crítico para uma ruptura brusca. Não existe um mecanismo geral para explicar tal fenômeno, cada par material-meio específico apresenta suas particularidades.<sup>2</sup>

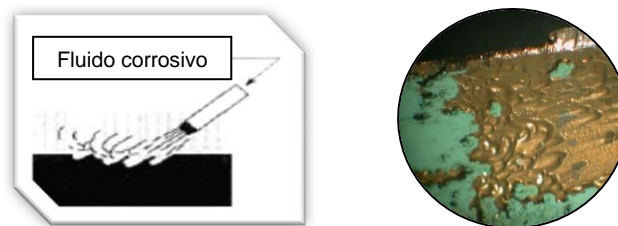


**Figura 11** – Corrosão sob tensão (CST).

As trincas decorrentes da CST podem ser intergranulares ou transgranulares. A corrosão intergranular se processa entre os grãos da rede cristalina do material metálico, o qual perde suas propriedades mecânicas e pode fraturar quando solicitado por esforços mecânicos, tendo-se então a CST. Já a corrosão transgranular se processa nos grãos da rede cristalina do material metálico, o qual, perdendo suas propriedades mecânicas, também poderá fraturar à menor solicitação mecânica, gerando a CST.<sup>1</sup>

### 2.5.3. Corrosão-erosão

A erosão é um fenômeno puramente mecânico, em que ocorre a deterioração de materiais metálicos pela ação abrasiva de fluidos em movimento. Geralmente, é acelerada pela presença de partículas sólidas em suspensão. Nas palhetas da turbina, a erosão é causada pela ação das gotículas de água. A combinação de fluidos corrosivos e a alta velocidade de fluxo resulta na corrosão-erosão (Figura 12).<sup>1, 8</sup>



**Figura 12 – Corrosão-erosão.**

A corrosão produz a camada passivadora e o processo erosivo a remove, expondo a superfície a novo desgaste corrosivo. O resultado final será um desgaste muito maior do que se apenas o processo corrosivo ou erosivo agisse isoladamente.<sup>2</sup>

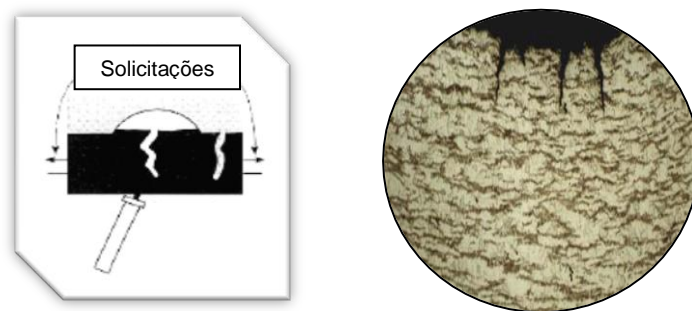
### 2.5.4. Corrosão com Cavitação

Cavitação é o desgaste provocado em uma superfície metálica devido a ondas de choque produzidas no meio, oriundas do colapso de bolhas de vapor fluido. A cavitação, da mesma forma que a erosão, destrói as películas de produtos de corrosão (camada passivadora) expondo o material a novo desgaste corrosivo.<sup>2</sup>

### 2.5.5. Corrosão-fadiga

A fadiga de um material (Figura 13) é a progressão de uma trinca a partir da superfície até a fratura, quando o material é submetido a solicitações mecânicas cíclicas. A fadiga inicia-se em uma imperfeição que é um ponto de

concentração de tensões e progride perpendicularmente à tensão. A trinca, após atingir um tamanho crítico, rompe bruscamente o material, causando a falha do equipamento por fadiga. Um processo corrosivo pode ser a causa do surgimento da trinca superficial por onde se inicia a fadiga (pites, por exemplo). A base da trinca é uma região tensionada e encruada que age como área anódica em relação ao restante do material, logo a presença de um eletrólito no interior da trinca provoca corrosão e acelera a progressão da mesma.<sup>2</sup>



**Figura 13 – Corrosão-fadiga**

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1. Objetivo Geral**

A presente proposta deste trabalho tem por objetivo aumentar a base de conhecimento referente às causas e efeitos da corrosão no aço inoxidável AISI 403 utilizado na confecção de palhetas e rotores de turbinas a vapor de baixa pressão, em função das características físico-químicas do condensado.

#### **3.2. Objetivos Específicos**

- Simular em laboratório, com auxílio de experimento eletroquímico com eletrodo rotatório e não-rotatório, a corrosão localizada por pites em meios de alta concentração salina, simulando o meio corrosivo encontrado no estágio L-1 das palhetas da turbina de baixa pressão da UTJLC.

- Reproduzir em laboratório as características físico-químicas da água utilizada na geração de vapor da turbina de baixa pressão, possibilitando verificar pelos ensaios eletroquímicos a velocidade de corrosão do aço inoxidável AISI 403 em meios de cloreto de sódio, NaCl, a 25% e hidróxido de sódio, NaOH, a 40%.

- Discutir os resultados obtidos experimentalmente em laboratório frente às características observadas em campo.

- Contribuir para o Projeto de Pesquisa & Desenvolvimento intitulado “Desenvolvimento de uma Metodologia para Análise e Controle de Corrosão e Detecção Preventiva de Condições de Falhas em Palhetas de Turbinas a Vapor”, financiado pela empresa Tractebel Energia – GDF Suez e executado pelo Laboratório de Eletroquímica e Corrosão – LeCORR, pertencente ao Departamento de Química da Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, tendo como principal resultado a elaboração do trabalho científico “Avaliação Eletroquímica da Corrosão do Aço AISI 403 em Palhetas de Turbinas a Vapor”, 10ª COTEQ - Conferência sobre Tecnologia de Equipamentos, Salvador - Bahia.

## 4. MATERIAIS & MÉTODOS

### 4.1. Estudos Eletroquímicos

Os aços inoxidáveis são empregados na confecção de algumas peças que compõem as turbinas a vapor, entre os materiais utilizados estão as classes de aço inoxidável AISI 403 e 410. Para a execução do estudo eletroquímico deste trabalho, na montagem da célula eletroquímica, foram utilizados eletrodo de trabalho cilíndrico em aço inoxidável AISI 403 e eletrodos de referência e contra-eletrodos, também cilíndricos, em *Hastelloy C*, com o intuito de aproximar-se das condições do sistema em estudo. Um eixo confeccionado em aço SAE 1045 serviu como suporte para os eletrodos de trabalho e este foi, então, fixado ao rotor *Pine Instruments Company* – Modelo ASR, como apresentado na Figura 14. O equipamento utilizado para obtenção dos dados foi o Potenciostato / Galvanostato GAMRY PC4 – ZRA e, para o tratamento dos dados, foi utilizado o software GAMRY *Framework 3.2*.



**Figura 14** – a) Eixo suporte fixado ao rotor *Pine Instruments Company* – Modelo ASR utilizado nos testes. b) Corpo de prova fabricado em aço inoxidável AISI 403.

Os potenciais eletroquímicos dos materiais *Hastelloy C* e aço inoxidável AISI 403, quando medidos na série galvânica em água do mar, apresentam uma significativa diferença de potenciais e, por esse motivo, o papel do *Hastelloy C* servir como eletrodo de pseudo-referência, por ser uma liga nobre. Para a execução dos ensaios, foram preparadas soluções-estoque de cloreto de sódio, NaCl, a 25% (pH próximo a 7,30) e hidróxido de sódio, NaOH, a 40% (pH próximo a 11,70), com grau de pureza analítico e água deionizada. Os

estudos eletroquímicos, conduzidos em uma célula eletroquímica (Figura 15), visam simular o meio corrosivo da turbina de baixa pressão da UTJLC.



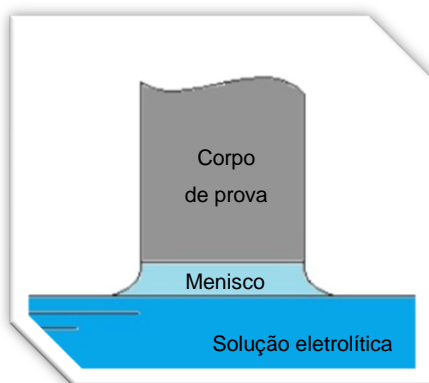
**Figura 15** – Imagem ilustrativa do equipamento *Pine Instruments Company* – Modelo ASR, da célula eletroquímica (contendo NaCl a 25%) e do eletrodo rotatório.

Os métodos eletroquímicos utilizados nesse estudo foram polarização potenciodinâmica e curvas de Tafel. As condições analisadas nos testes eletroquímicos foram em corpo de prova com formação de menisco com a solução eletrolítica e corpo de prova sob rotação e sem rotação.

#### **4.2. Técnica do Menisco**

Durante o processo de geração de vapor nas turbinas de baixa pressão, ocorre a deposição de sais em um filme bastante fino formado sobre a superfície das palhetas. Visando, unicamente, obter situações eletroquímicas semelhantes aquelas encontradas nas gotículas do condensado sobre a superfície da palheta, propôs-se testar o experimento eletroquímico com a técnica do menisco. Para se obter esta superfície curva no líquido entre o eletrodo de trabalho e a solução, apenas a base do corpo de prova ficou em contato com a solução, formando o menisco. Essa técnica é bastante incipiente, com poucas citações na literatura, mas tem demonstrado bons resultados em trabalhos anteriores.<sup>15</sup>

Sendo assim, para efetivar a técnica em laboratório, o eletrodo foi inicialmente mergulhado no seio da solução corrosiva e, com o auxílio do mecanismo parafuso-cremalheira disponível no equipamento rotatório, este foi lentamente puxado para cima da superfície do líquido, ficando levemente do nível da solução e formando um menisco, como indicado na Figura 16.



**Figura 16** – Esquema da preparação do corpo de prova, utilizando a técnica do menisco.

O corpo de prova teve sua base polida com alumina antes de cada ensaio eletroquímico. O polimento foi feito com o próprio sistema rotatório, com o eletrodo mergulhado na suspensão de alumina sob rotação de 1.500 rpm, sendo lavado na seqüência com água deionizada e etanol, respectivamente.

#### 4.3. Parâmetros Utilizados nos Estudos Eletroquímicos

Na Tabela II encontram-se os parâmetros utilizados nos estudos eletroquímicos.

**Tabela II** – Parâmetros utilizados nos estudos eletroquímicos.

PARÂMETROS	POLARIZAÇÃO POTENCIODINÂMICA	TAFEL
Potencial inicial (V)	-0,5 vs $E_{oc}$	-0,25 vs $E_{oc}$
Potencial final (V)	1,25 vs $E_{oc}$	0,25 vs $E_{oc}$
Velocidade de varredura ( $mV s^{-1}$ )	5	1
Período de amostragem (s)	1	2



Área da amostragem (cm <sup>2</sup> )	1	1
Densidade (g cm <sup>-3</sup> )	7,87	7,87
Peso equivalente	27,92	27,92

## 5. RESULTADOS & DISCUSSÕES

A seguir, são apresentados e discutidos os resultados obtidos na etapa experimental do presente trabalho. Como anteriormente citado, os métodos eletroquímicos utilizados nesse estudo foram polarização potenciodinâmica e curvas de Tafel. As condições analisadas nos testes eletroquímicos foram em corpo de prova com formação de menisco com a solução eletrolítica e corpo de prova sob rotação e sem rotação.

### 5.1. Estudos Eletroquímicos de Tafel

#### 5.1.1. Eletrodos Rotatórios

Através da Tabela III é possível observar os valores de  $i_{corr}$ , obtidos pelo plote de Tafel, para as soluções de cloreto de sódio, NaCl, a 25% e hidróxido de sódio, NaOH, a 40% em eletrodo rotatório.

**Tabela III** – Estudos eletroquímicos de Tafel em eletrodo rotatório.

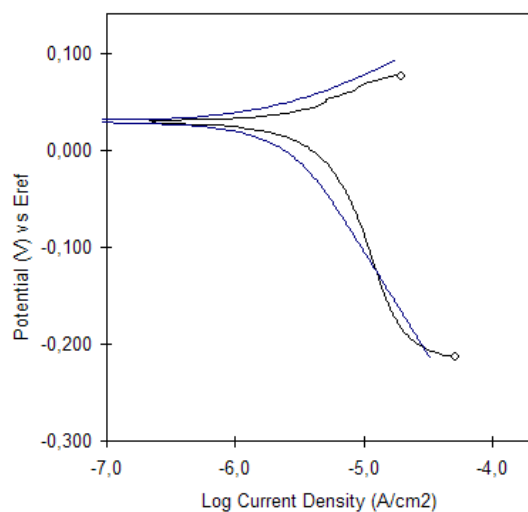
Eletrodo rotatório (1.500 rpm) de aço inoxidável AISI 403				
Solução	Tafel			Classificação*
	$E_{corr}$ (V)	$i_{corr}$ (A cm <sup>-2</sup> )	Velocidade de Corrosão (mm ano <sup>-1</sup> )	
NaCl (25%)	-0,133	$6,81 \times 10^{-6}$	0,079	Excelente
NaOH (40%)	-0,215	$1,01 \times 10^{-8}$	0,012	Extraordinário

\*Segundo classificação de Fontana.<sup>16</sup>

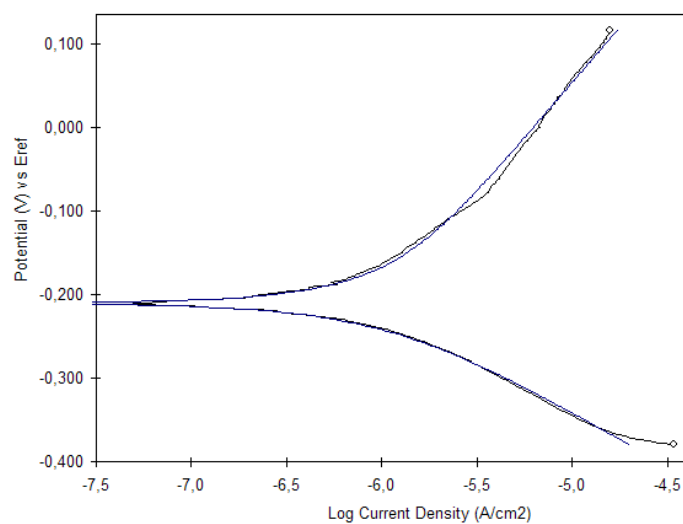
A diferença dos valores de  $i_{corr}$  entre as soluções de NaCl a 25% e NaOH a 40% na Tabela II deve-se a susceptibilidade à corrosão do aço inoxidável em meios contendo íons cloreto. Apesar da concentração de NaCl

ser menor do que a concentração de NaOH, o cloreto rompe a camada passivadora do aço inoxidável AISI 403 deixando-o exposto ao meio corrosivo.

As Figuras 17 e 18 apresentam os gráficos de Tafel para cada uma das análises, respectivamente.



**Figura 17** – Gráfico de Tafel para solução contendo NaCl a 25% em eletrodo rotatório.



**Figura 18** – Gráfico de Tafel para solução contendo NaOH a 40% em eletrodo rotatório.

Segundo a classificação de Fontana<sup>16</sup>, os dois casos analisados apresentam excelente resistência à corrosão em NaCl a 25% e extraordinária resistência à corrosão em NaOH a 40%.

### 5.1.2. Eletrodos Não-rotatórios

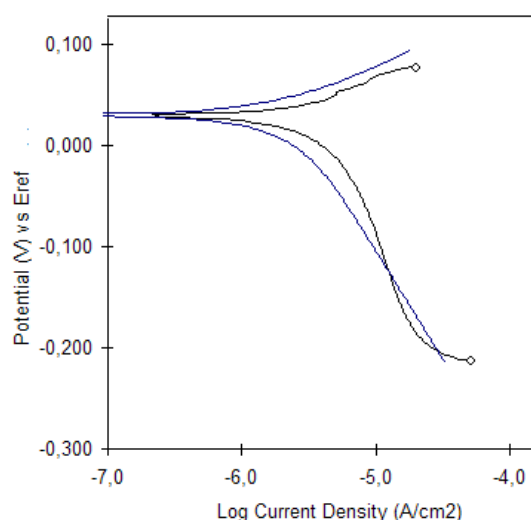
A Tabela IV apresenta os valores obtidos nas análises de Tafel em corpo de prova não-rotatório. Assim, como no caso anterior, utilizando eletrodo rotatório, os valores de  $i_{\text{corr}}$  são bastante próximos, quando comparados à Tabela III, destacando que em solução contendo NaCl a 25%, os valores de  $i_{\text{corr}}$  são superiores a solução de NaOH a 40%.

**Tabela IV** – Estudos eletroquímicos de Tafel em eletrodo não-rotatório.

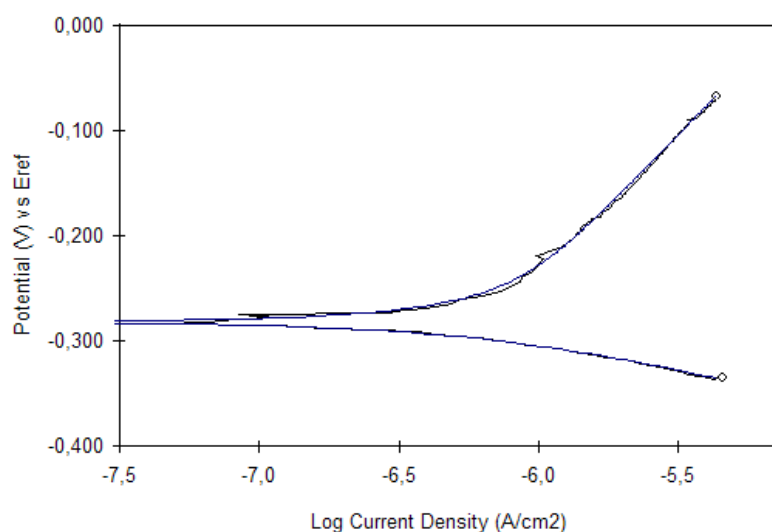
Eletrodo não-rotatório de aço inoxidável AISI 403				
Solução	Tafel			Classificação*
	$E_{\text{corr}}$ (V)	$i_{\text{corr}}$ (A cm <sup>-2</sup> )	Velocidade de Corrosão (mm ano <sup>-1</sup> )	
NaCl (25%)	0,030	$2,38 \times 10^{-6}$	0,028	Excelente
NaOH (40%)	-0,282	$6,94 \times 10^{-7}$	0,008	Extraordinário

\*Segundo classificação de Fontana.<sup>16</sup>

As Figuras 19 e 20 apresentam os gráficos obtidos pelo estudo eletroquímico de Tafel. A classificação de Fontana<sup>16</sup> para NaCl a 25% e NaOH 40% é, respectivamente, excelente e extraordinária para a resistência à corrosão.



**Figura 19** – Gráfico de Tafel para solução contendo NaCl a 25% em eletrodo não-rotatório.



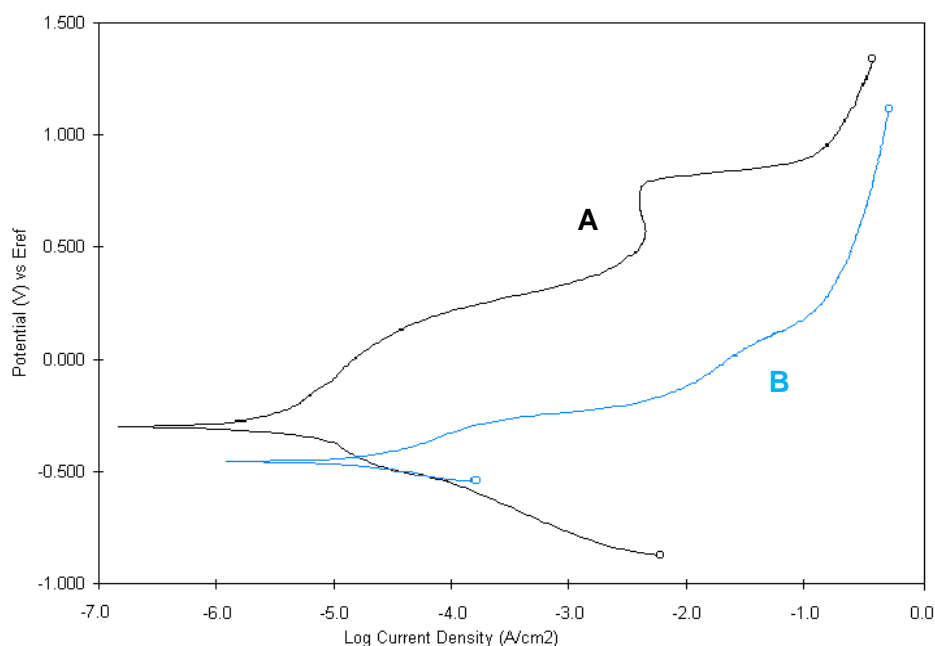
**Figura 20** – Gráfico de Tafel para solução contendo NaOH a 40% em eletrodo não-rotatório.

Quando comparados os dados das análises utilizando eletrodo rotatório e não-rotatório, é possível perceber que no primeiro caso (NaCl a 25% em eletrodo rotatório) a velocidade de corrosão é superior aos demais sistemas, devido a presença de íons cloreto. Outro componente importante a ser considerado é a transferência de massa. Devido às reações eletroquímicas que ocorrem na superfície do metal durante os processos corrosivos, um gradiente de concentração se forma desde o meio eletrolítico até a parede metálica. Este gradiente é comprometido quando o meio apresenta agitação, pois facilita o transporte de espécies químicas em direção à superfície. Assim, os processos corrosivos são fortemente favorecidos.<sup>11, 17</sup>

## 5.2. Polarização Potenciodinâmica

Nos estudos realizados em solução de NaOH a 40% o gráfico (Figura 21 A) em preto apresenta um perfil muito similar ao gráfico teórico, apresentado inicialmente no *Item 2.2.1.* deste trabalho. Como pode ser visto na Figura 21 A, o perfil potenciodinâmico do corpo de prova AISI 403, em solução de NaOH a 40%, representa o comportamento de um material muito resistente à polarização anódica, pois o aço inoxidável nestas condições, geralmente, apresenta-se passivado. Já em solução contendo NaCl a 25% (Figura 21 B) há

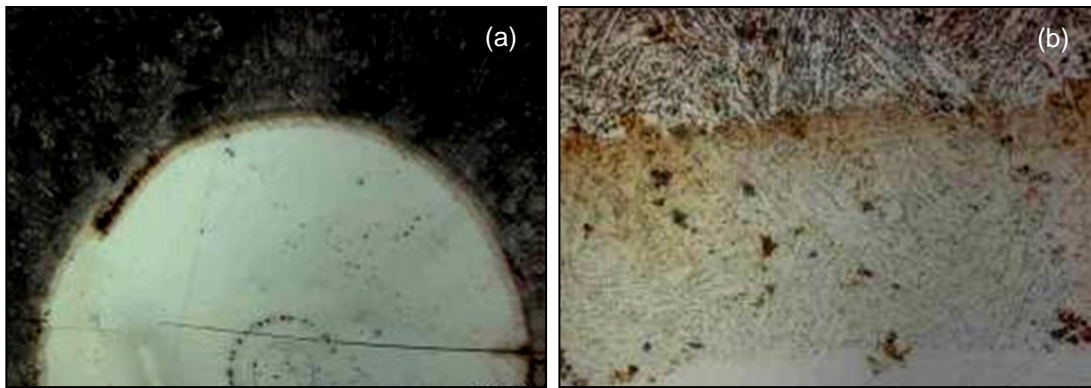
uma sutil tendência a passivação, representado por um pequeno ombro entre os valores -100 mV e  $0.015 \text{ A cm}^{-2}$ .



**Figura 21** – Gráficos sobrepostos do ensaio potenciodinâmico em A) solução de NaOH a 40% e B) solução de NaCl a 25%.

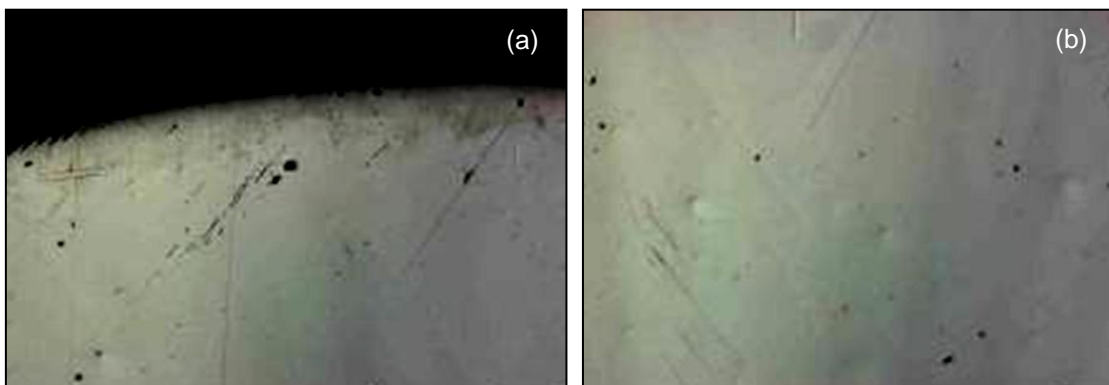
Na sobreposição dos gráficos resultantes de ambos os ensaios (Figura 21 A e B) em NaOH a 40% e NaCl a 25%, pode-se observar melhor resistência à corrosão do aço inoxidável AISI 403 em solução contendo hidróxido de sódio, quando comparado ao comportamento do mesmo material em solução contendo cloreto de sódio. Através dos gráficos é claramente observada a diferença dos valores de  $E_{\text{corr}}$ , sendo a resistência à corrosão do aço inoxidável AISI 403 reduzida devido à presença do íon cloreto.

Com o aumento do potencial, ocorre perda do material, como mostra a Figura 22 (imagens retiradas por Microscópio Eletrônico de varredura – MEV) para o ensaio em NaCl a 25%.



**Figura 22** – Corpo de prova AISI 403 após teste potenciodinâmico em solução de NaCl a 25%, onde (a) aumento de 50 vezes e (b) aumento de 1000 vezes no MEV.

No ensaio realizado em solução de NaOH a 40%, não foi observado perda de material, tampouco produtos de corrosão (Figura 23). Ao final do ensaio, o material se manteve nas mesmas condições iniciais.



**Figura 23** - Corpo de prova AISI 403 após teste potenciodinâmico em solução de NaOH a 40%, onde (a) aumento de 50 vezes e (b) aumento de 1000 vezes no MEV.

O valor do potencial de circuito aberto é de -389 mV em solução de NaCl a 25%, enquanto que em solução de NaOH a 40% é de -31.38 mV. A diferença entre os valores indica que o material, quando em contato com a solução de NaOH apresenta um comportamento passivante, enquanto que, o mesmo material quando em contato com a solução de NaCl, mostra que o potencial atinge um valor negativo, indicando menor resistência do material à corrosão nestas condições. Conseqüentemente, os valores de  $i_{corr}$  apresentam diferença de pouco mais de uma ordem de grandeza, indo de  $7,74 \times 10^{-5} \text{ A cm}^{-2}$  em NaCl para  $2,45 \times 10^{-6} \text{ A cm}^{-2}$  em NaOH, como apresentado na Tabela V.

**Tabela V** – Estudo eletroquímico de polarização potenciodinâmica.

Eletrodo rotatório AISI 403	Solução	$E_{ocp}$ (V)	$E_{corr}$ (mV)	$i_{corr}$ (A cm <sup>-2</sup> )	Velocidade de Corrosão (mm ano <sup>-1</sup> )	Classificação*
	NaCl a 25%	-0,389	-472,9	$7,74 \cdot 10^{-5}$	0,898	Excelente
	NaOH a 40%	-0,031	-268,6	$2,45 \cdot 10^{-6}$	0,028	Excelente

\*Segundo classificação de Fontana.<sup>16</sup>

Apesar da diferença entre os valores de  $i_{corr}$ , segundo a classificação de Fontana<sup>16</sup>, em ambos os casos a resistência à corrosão no  $E_{corr}$  é excelente.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os estudos laboratoriais de polarização potenciodinâmica e Tafel, visando simular as condições de operação da turbina de baixa pressão em soluções eletrolíticas contendo NaCl a 25% e NaOH a 40%, mostraram que tanto em corpo de prova estático quanto rotatório a velocidade de corrosão se torna mais acentuada na solução (meio) contendo íons cloreto. O estudo por polarização potenciodinâmica, em solução de NaOH a 40%, apresentou região de passivação superior quando correlacionado à solução de NaCl a 25%. Portanto, conclui-se que o NaCl, mesmo em concentração inferior ao NaOH, é mais agressivo ao aço inoxidável AISI 403, utilizado na fabricação de turbinas a vapor de baixa pressão.

Tanto na presença de NaCl quanto de NaOH, de acordo com a classificação de Fontana<sup>16</sup>, o aço inoxidável AISI 403 apresenta excelente resistência à corrosão. Entretanto, a falha ocasionada nas palhetas da turbina de baixa pressão da UTJLC, durante operação, ocorreu devido a diversos processos corrosivos. A formação de pites nas palhetas por íons cloreto, associado à fadiga do equipamento, à corrosão-erosão e às tensões residuais resultaram na quebra de uma palheta e ao trincamento de outras trinta nove, culminando na parada de máquina e ao lucro cessante da Usina.

Como a corrosão tem sua base científica bem definida, deve-se procurar esclarecer os mecanismos dos processos corrosivos, a fim de indicar os métodos adequados de proteção ou mesmo modificações de projeto. Nenhum desenvolvimento tecnológico, por mais simples que seja, dispensa o estudo teórico dos seus fenômenos. Apesar de alguns aspectos teóricos não serem aplicáveis rigorosamente em todos os casos práticos, na maioria deles a parte teórica se constitui num guia para o controle da corrosão, evitando que se cometam falhas já na fase de projetos de equipamentos e instalações industriais.



## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- <sup>1</sup> GENTIL, V. **Corrosão**. LTC, 5ª ed., Rio de Janeiro, 2007.
- <sup>2</sup> NUNES, L. P. **Fundamentos de Resistência à Corrosão**. Editora Interciência, Rio de Janeiro, 2007.
- <sup>3</sup> VIRMANI, Y. P., **Corrosion Costs and Preventive Strategies in the United States**. CC Technologies, United States of America, Publication N°. FHWA-RD-01-156, 2008.
- <sup>4</sup> Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, 3ª ed., Brasília, 2008.
- <sup>5</sup> PACHECO, D. S.; SONAI, G. G.; FRECH, W. A.; GODINHO, J. F.; FRANCO, C. V.; TORRES, L. A. M.; ELLWANGER, A. R. F. **Avaliação Eletroquímica da Corrosão do Aço AISI 403 em Palhetas de Turbina a Vapor**. 10ª. COTEQ – Conferência Sobre Tecnologia de Equipamentos, Salvador, 2009.
- <sup>6</sup> American Society of Materials – ASM. **Handbook Volume 13 – Corrosion**. ASM International Handbook Committee, United States of America, 1987.
- <sup>7</sup> PARANZINI, A. S. **Caracterização Superficial do Aço Inoxidável 316L Eletropolido Via Técnica Eletroquímica de Reativação Potenciodinâmica**. Florianópolis, 2005. Dissertação de Mestrado – Pós-Graduações de Materiais, UFSC.
- <sup>8</sup> JONES, D. A. **Principles and Prevention of Corrosion**. Prentice-Hall, ed. 2, 1996.
- <sup>9</sup> OLIVEIRA, G. H. L.; ALONSO, N. **Determinação do Potencial de Pite de Aço Inoxidável Ferrítico por Métodos Potenciodinâmicos e Potenciostáticos**. PIC EPUSP, 2002.
- <sup>10</sup> ALONSO, N. **Análise do Método Potenciostático de Determinação do Potencial de Pite**. São Paulo, 1992. Tese de doutorado – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

- <sup>11</sup> BISANG, J. M.; GRAU, J. M. **Massa Transference Studies at Three-Dimensional Rotating Cylinder Electrodes**. 2<sup>nd</sup> Mercosur Congress on Chemical Engineering and 4<sup>th</sup> Mercosur Congress on Process Systems Engineering.
- <sup>12</sup> JONAS, O.; MACHEMER, L. M. **Jorge Lacerda C – LP Turbine Inspection and Deposit Analysis**. 2005.
- <sup>13</sup> LINDINGER, R. J.; CURRAN, R. M. **Effect of Steam Impurities on the Reliability of Large Modern Steam Turbines**. General Electric Large Steam Turbine Seminar. 1984.
- <sup>14</sup> SVOBODA, R.; BODMER, M. **Investigations in to the Composition of the Water Phase in Steam Turbines**. 14<sup>th</sup> International Conference on the Properties of Water and Steam in Kyoto, p. 594-601, 2004.
- <sup>15</sup> MORONA, M. T. **Ensaaios Eletroquímicos e Influência da Nitretação a Plasma na Resistência à Corrosão do Aço Inoxidável ISSO 5832-1**. Curitiba, 2007. Dissertação de Mestrado. PPGEM UTFPR.
- <sup>16</sup> FONTANA, M. G. **Corrosion Engineering**. McGraw – Hill, 3<sup>rd</sup> Ed., p. 172, 1986.
- <sup>17</sup> MOREIRA, R. M. **Avaliação da Resistência à Corrosão dos Aços Inoxidáveis 13Cr e 13Cr-5Ni-2Mo em Meios Úmidos de CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>S Presentes em Colunas de Produção de Petróleo**. Florianópolis, 2004. Tese de Doutorado – CPGQMC UFSC.